

MODEL OSILATOR WIEN DENGAN PEMBATAS AMPLITUDO MENGGUNAKAN LAMPU TUNGSTEN

Setyo Adi Cahyono

Jurusan Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya
e-mail: setyocahyono@mhs.unesa.ac.id

Abadi

Jurusan Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya
e-mail: abadi@unesa.ac.id

Abstrak

Osilator Wien merupakan salah satu dari rangkaian standar yang digunakan untuk membangkitkan sinyal-sinyal gelombang sinus dalam rangkaian frekuensi audio dan memiliki suatu jaringan leading dan leagging dalam jalur umpan balik positif serta rangkaian pembagi tegangan dalam jalur umpan balik negatif. Lampu tungsten merupakan lampu dengan filamen dari tungsten digunakan pada pembagi tegangan untuk menstabilkan tegangan keluaran. Dalam penelitian ini dibahas tentang model osilator Wien dan amplitudo osilasi dengan lampu tungsten sebagai pembatas amplitudo yang digunakan untuk mengetahui dan menggambarkan grafik hubungan amplitudo dengan resistansi umpan balik (feedback) dan resistansi lampu tungsten. Selain itu juga menjelaskan grafik sistem osilasinya. Hasil simulasi menunjukkan pada waktu gain lebih dari 3 dB maka sistem mulai berosilasi dan pada waktu gain sama dengan 3 dB maka sistem sudah berosilasi secara stabil atau dengan kata lain sistem berosilasi di atas waktu 0,8 detik secara periodik.

Kata Kunci : osilator Wien, lampu tungsten, osilasi, amplitudo.

Abstract

Wien oscillator is one of the standard circuits used to generate sinus wave signals in audio frequency circuits and has a leading and leagging network in a positive feedback path and a voltage divider circuit in a negative feedback path. Tungsten lamp is a lamp with filament of tungsten used in voltage divider to stabilize output voltage. In this research will be discussed about the oscillator model of Wien and the amplitude of oscillation with limiting amplitude using tungsten lamp which is used to know and describe graph about the relation between amplitude with feedback resistance and tungsten lamp resistance. Beside that, it will explain about graph of oscillation system. The simulation results show that when the gain is more than 3 dB, the system begins to oscillate and when the gain is equal to 3 dB the system oscillates stably or in other words the system oscillates over 0,8 seconds periodically.

Keywords : Wien oscillator, tungsten lamp, oscillation, amplitude.

PENDAHULUAN

Banyak permasalahan muncul pada bidang-bidang Biologi, Fisika, Kimia, Teknik, Kesehatan dan sebagainya yang dapat dinyatakan ke dalam model matematika dalam bentuk persamaan diferensial, baik itu persamaan diferensial biasa maupun parsial. Pemodelan matematika merupakan bidang matematika yang berusaha untuk mempresentasi dan menjelaskan sistem-sistem fisik atau problem di dunia real dalam pernyataan matematika sehingga diperoleh pemahaman dari problem dunia real ini menjadi lebih tepat. Sehingga akan diterapkan prinsip-prinsip matematika yang relevan yang akan menghasilkan sebuah model matematika yang diharapkan.

Osilator merupakan rangkaian yang dapat menghasilkan sinyal output tanpa adanya sebuah sinyal input yang diberikan. Keluaran osilator bisa berupa bentuk sinusoida, persegi, dan segitiga. Osilator berbeda dengan penguat, karena penguat memerlukan syarat untuk

menghasilkan syarat keluaran, dalam osilator tidak ada syarat masukan melainkan ada syarat keluaran saja (Susanti, Eka. 2014: 48).

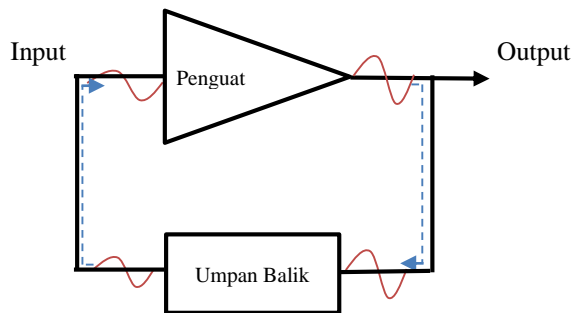
Osilator Wien merupakan salah satu dari rangkaian standar yang digunakan untuk membangkitkan sinyal-sinyal gelombang sinus dalam rangkaian frekuensi audio. Amplitudo dapat didefinisikan sebagai jarak atau simpangan terjauh dari titik kesetimbangan dalam getaran atau gelombang sinusoide. Osilator Wien memiliki suatu jaringan leading (mendahului) dan leagging (ketinggalan) dalam jalur umpan balik positif serta rangkaian pembagi tegangan dalam jalur umpan balik negatif. Lampu tungsten merupakan lampu dengan filamen dari tungsten digunakan pada pembagi tegangan untuk menstabilkan tegangan keluaran. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan dibahas tentang model, amplitudo osilasi dari Osilator Wien dengan pembatas amplitudo menggunakan lampu tungsten dan simulasinya.

KAJIAN PUSTAKA

A. Osilator

Osilator adalah suatu alat gabungan dari elemen aktif dan pasif untuk menghasilkan bentuk gelombang sinusoidal atau bentuk gelombang periodik lainnya. Suatu osilator memberikan tegangan keluaran dari suatu bentuk gelombang yang diketahui tanpa penggunaan sinyal masukan dari luar (Chattopadhyay, 1984: 256). Keluaran osilator bisa berupa bentuk sinusoidal, persegi, dan segitiga. Osilator berbeda dengan penguat, karena penguat memerlukan syarat untuk menghasilkan syarat keluaran, dalam osilator tidak ada syarat masukan melainkan ada syarat keluaran saja (Susanti, 2014: 48).

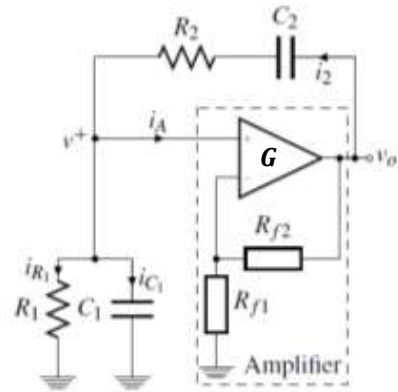
Sebuah rangkaian osilator sederhana terdiri dari dua bagian utama, yaitu penguat (Amplifier) dan umpan balik (Feedback). Berikut ini blok diagram dasar sebuah rangkaian osilator.



Gambar 1. Blok Diagram Dasar Osilator

Pada dasarnya, osilator menggunakan sinyal kecil atau desahan kecil yang berasal dari penguat itu sendiri. Pada saat penguat atau amplifier diberikan arus listrik, desah kecil akan terjadi, desah kecil tersebut kemudian diumpan balik ke penguat sehingga terjadi penguatan sinyal, jika keluaran (output) penguat sefasa dengan sinyal yang diumpan balik (masukan) tersebut, maka osilasi akan terjadi.

B. Osilator Wien

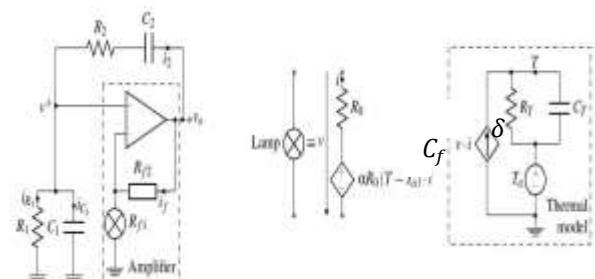


Gambar 2. Rangkaian Osilator Wien (Casaleiro, João. et al, 2014)

Rangkaian osilator Wien pada dasarnya terbentuk dari rangkaian op-amp non pembalik dengan sebuah resistansi R_1 yang dihubungkan di antara kaki atau pin masukan, serta sebuah resistansi feedback (R_{f1} dan R_{f2}) yang dihubungkan di antara pin keluaran dan masukan pembalik. Dengan i_{R1} adalah arus yang melalui resistansi R_1 , i_{C1} adalah arus yang melalui kapasitansi C_1 , i_A adalah arus input dari penguat operasional atau Gain (G), resistansi R_2 , kapasitansi C_2 dan tegangan keluaran v_0 .

Osilator Wien merupakan salah satu dari rangkaian standar yang digunakan untuk membangkitkan sinyal-sinyal gelombang sinus dalam rangkaian frekuensi audio. Osilator ini ditemukan oleh Max Wien yang lahir pada tahun 1866 di Kaliningrad Rusia dan tinggal di Jerman. Tipe osilator ini adalah tipe paling simpel dan populer yang banyak digunakan dalam aplikasi audio.

Osilator Wien memiliki suatu jaringan leading (mendahului) dan leaging (ketinggalan) dalam jalur umpan balik positif serta rangkaian pembagi tegangan dalam jalur umpan balik negatif. Lampu tungsten merupakan lampu dengan filamen dari tungsten digunakan pada pembagi tegangan untuk menstabilkan tegangan keluaran.



Gambar 3. Rangkaian Osilator Wien dengan Pembatas Lampu Tungsten (Casaleiro, João. et al, 2014)

Rangkaian osilator Wien dengan pembatas amplitudo menggunakan lampu tungsten (pijar) dimana model lampu seperti gambar di atas dengan R_0 adalah resistansi pada temperatur referensi (T_0), α adalah koefisien temperatur dari resistansi, T adalah temperatur filamen, δ adalah resistansi termal dari lampu dan C_f adalah kapasitansi termal dari lampu.

C. Hukum Kirchoff

Dalam hukum Kirchoff dikenal 2 teori yang dapat digunakan untuk analisis rangkaian elektronika yaitu: Hukum Kirchoff-Arus (KCL, Kirchoff Current Law) dan Hukum Kirchoff-Tegangan (KVL, Kirchoff Voltage Law).

Hukum Kirchoff-Arus merupakan hukum kirchoff 1 yang menyatakan bahwa “Arus total yang masuk pada suatu titik sambungan atau percabangan adalah nol”. Hukum kirchoff arus ini dapat dinyatakan dalam persamaan matematika sebagai berikut :

$$\sum i_n = 0 \text{ (Purnama, 2012).}$$

D. Hukum Ohm

Hukum Ohm yaitu hukum dasar yang menyatakan hubungan antara Arus Listrik (I), Tegangan (V) dan Hambatan (R). Hukum Ohm dalam bahasa Inggris disebut dengan “Ohm’s Laws”. Pada dasarnya, bunyi dari Hukum Ohm adalah :

“Besarnya arus listrik (I) yang mengalir melalui sebuah penghantar atau Konduktor akan berbanding lurus dengan beda potensial / tegangan (V) yang diterapkan kepadanya dan berbanding terbalik dengan hambatannya (R)”.

Secara matematis, Hukum Ohm dapat dirumuskan menjadi persamaan seperti dibawah ini :

$$V = I \times R$$

dimana :

V : Voltage (Beda Potensial atau Tegangan dengan satuan Volt (V))

I : Current (Arus Listrik dengan satuan Ampere (A))

R : Resistance (Hambatan atau Resistansi dengan satuan Ohm (Ω))

E. Persamaan Diferensial

Persamaan diferensial adalah persamaan yang memuat turunan satu atau beberapa fungsi yang tak diketahui atau persamaan yang melibatkan variabel-variabel tak bebas dan derivatif-derivatifnya terhadap variabel-variabel bebas. Berikut contoh persamaan diferensial :

$$1. \quad y'' - y' + 2y = 0$$

Dengan $y \in \mathbb{R}$ dan y adalah variabel yang bergantung pada x dan x merupakan variabel bebas. $y' \equiv \frac{dy}{dx}$, sementara $y'' \equiv \frac{d^2y}{dx^2}$.

$$2. \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$$

u merupakan variabel yang bergantung pada x dan y dan bisa ditulis $u(x, y)$ dengan $x \in \mathbb{R}$, $y \in \mathbb{R}$. $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ merupakan turunan kedua variabel u terhadap x , sementara $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ merupakan turunan kedua u terhadap y .

F. Persamaan Diferensial Orde 1

Bentuk umum PD orde 1 adalah

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y) \quad (1)$$

dengan f adalah fungsi dengan dua peubah t dan y . Sebarang fungsi $y = g(t)$ yang memenuhi Pers. (2.1) untuk semua nilai t pada suatu interval tertentu dinamakan penyelesaian. Penyelesaian suatu PD ada dua macam yaitu, penyelesaian umum dan penyelesaian khusus. Penyelesaian khusus muncul ketika suatu PD disertai dengan nilai y pada saat t tertentu, misal $y(0) = 1$. Banyak cara untuk menentukan penyelesaian suatu persamaan diferensial PD orde 1 sebagai berikut :

1. Persamaan Diferensial Orde 1 Linear

Jika fungsi f pada Pers. (1) linier pada variabel tak bebas y , maka persamaan tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk

$$\frac{dy}{dt} = -P(t)y + Q(t) \quad (2)$$

$$y' + P(t)y = Q(t) \quad (3)$$

dan disebut Persamaan Diferensial Linier Orde 1. Diasumsikan bahwa $P(t)$ dan $Q(t)$ adalah fungsi kontinu pada suatu selang tertentu $\alpha < t < \beta$. Sebagai contoh, persamaan diferensial

$$\frac{dy}{dt} + 2y = 1 \quad (4)$$

dengan $P(t) = 2$ dan $Q(t) = 1$ adalah fungsi konstan.

2. Faktor Integrasi

Misal diberikan dua fungsi masing-masing $u(t)$ dan $v(t)$, maka

$$\frac{d(uv)}{dt} = v \frac{d(u)}{dt} + u \frac{d(v)}{dt} \quad (5)$$

Mengacu pada Pers. (1) akan ditentukan suatu fungsi $\mu(t)$ sedemikian hingga jika $\mu(t)$ dikalikan ke Pers. (1) maka ruas kiri dapat dipandang sebagai $\frac{d(\mu y)}{dx}$.

Kalikan $\mu(t)$ pada Pers. (1) didapat

$$\mu y' + \mu P y = \mu Q \quad (6)$$

Perhatikan ruas kiri persamaan (6),

$$\mu y' + \mu P y = \frac{d(\mu y)}{dt} = y \frac{d(\mu)}{dt} + y' \mu \quad (7)$$

$$\Leftrightarrow y \frac{d(\mu)}{dt} = \mu P y \quad (8)$$

$$\Leftrightarrow \frac{d(\mu)}{d\mu} = P dt \quad (9)$$

Dengan mengintegrasikan kedua ruas, diperoleh

$$\mu = e^{\int P dt} \quad (10)$$

adalah faktor integrasi dengan mengambil nilai konstan hasil integrasi sama dengan nol.

Pers. (2.6) menjadi

$$\frac{d(\mu y)}{dt} = \mu Q \Leftrightarrow d(\mu y) = \mu Q dt \quad (11)$$

$$\Leftrightarrow \int d(\mu y) = \int \mu Q dt \quad (12)$$

$$\Leftrightarrow \mu y = \int \mu Q dt \quad (13)$$

$$\Leftrightarrow y = \frac{1}{\mu} \int \mu Q dt \quad (14)$$

$y = \frac{1}{\mu} \int \mu Q dt$ merupakan penyelesaian umum Persamaan Diferensial.

3. Persamaan Diferensial Orde 1 Eksak

Bentuk :

$$M(x, y) dx + N(x, y) dy = 0 \quad (15)$$

Ilustrasi :

Andaikan diberikan suatu fungsi $\Psi(x, y) = c$ dengan x dan y adalah variabel tak bebas yang bergantung pada t , maka $\frac{d(\Psi(x, y))}{dt} = 0$.

$$\frac{d(\Psi(x, y))}{dt} = \Psi_x(x, y) \frac{dx}{dt} + \Psi_y(x, y) \frac{dy}{dt} = 0 \quad (16)$$

PD Eksak dibentuk dari satu fungsi yang sama yaitu $\Psi(x, y)$, dengan $M(x, y) = \Psi_x(x, y)$, $N(x, y) = \Psi_y(x, y)$ dan $\Psi_{xy}(x, y) = \Psi_{yx}(x, y)$.

Pers. (15) disebut PD Eksak jika hanya jika $M_y(x, y) = N_x(x, y)$.

Penyelesaian dari PD adalah $\Psi_y(x, y) = c$.

Cara penyelesaian :

Ada dua alternatif yang bisa digunakan untuk menyelesaikan PD Eksak.

$$\Psi_x(x, y) = M(x, y)$$

$$\Psi(x, y) = \int M(x, y) dx + \varphi(y) \quad (17)$$

Karena $\Psi_y(x, y) = N(x, y)$ maka $\frac{d(\int M(x, y) dx)}{dx} + \varphi'(y) = N(x, y)$.

Kemudian didapat nilai $\varphi(y)$ dan disubstitusikan ke Pers. (17) sehingga fungsi $\Psi(x, y)$ dapat ditentukan.

$$\Psi_y(x, y) = N(x, y)$$

$$\Psi(x, y) = \int N(x, y) dy + \varphi(x) \quad (18)$$

Karena $\Psi_x(x, y) = M(x, y)$ maka $\frac{d(\int N(x, y) dy)}{dx} + \varphi'(x) = M(x, y)$.

Kemudian didapat nilai $\varphi(x)$ dan disubstitusikan ke Pers. (18) sehingga fungsi $\Psi(x, y)$ dapat ditentukan.

4. Persamaan Diferensial Orde 1 Tak Eksak

Jika Pers. (15) bukan merupakan PD Eksak, maka Pers. (15) menjadi suatu PD Eksak dengan mengalikan suatu fungsi tertentu (faktor integrasi) ke persamaan tersebut.

Misalkan faktor integrasinya adalah $\mu(x, y)$, maka kalikan ke Pers. (15)

$$\mu(x, y) \cdot M(x, y) dx + \mu(x, y) \cdot N(x, y) dy = 0 \quad (19)$$

Andaikan Pers. (19) adalah PD Eksak maka memenuhi

$$\frac{\partial(\mu(x, y) \cdot M(x, y))}{\partial y} = \frac{\partial(\mu(x, y) \cdot N(x, y))}{\partial x}$$

$$\mu_y \cdot M + \mu \cdot M_y = \mu_x \cdot N + \mu \cdot N_x \quad (20)$$

Karena fungsi μ merupakan fungsi dua variabel x dan y , maka kita mempunyai salah satu kemungkinan untuk fungsi ini sebagai berikut :

Jika fungsi μ hanya bergantung pada x saja, maka $\mu_y = 0$ Pers. (20) menjadi

$$\mu(M_y - N_x) = \mu_x \cdot N$$

$$\mu_x = \left(\frac{M_y - N_x}{N} \right) \mu \quad (21)$$

Pers. (21) akan terpenuhi jika hanya jika $\left(\frac{M_y - N_x}{N} \right) = f(x)$, karena μ hanya bergantung pada x saja. Sehingga Pers. (21) menjadi

$$\mu_x = f(x) \cdot \mu$$

$$\Leftrightarrow \frac{d\mu}{\mu} = f(x) dx$$

$$\Leftrightarrow \mu = e^{\int f(x) dx}$$

Jadi faktor integrasinya adalah $\mu = e^{\int f(x) dx}$.

G. Persamaan Diferensial Orde 2

Bentuk umum PD orde 2 :

$$y'' = f(t, y, y') \quad (22)$$

Pers. (22) dikatakan linear jika

$$f(t, y, y') = g(t) - p(t)y' - q(t)y \quad (23)$$

dengan f linear dalam y dan y' .

Pers. (22) dapat ditulis menjadi

$$y'' + p(t)y' + q(t)y = g(t) \quad (24)$$

Secara lebih luas, lebih banyak dijumpai dalam bentuk

$$P(t)y'' + Q(t)y' + R(t)y = G(t) \quad (25)$$

H. Transformasi Laplace

Terdapat berbagai cara untuk menyelesaikan permasalahan persamaan diferensial linear, salah satunya adalah dengan Transformasi Laplace. Transformasi Laplace dari fungsi $f(t)$ didefinisikan sebagai berikut

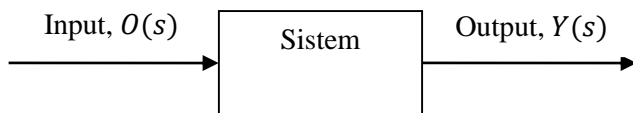
$$\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s) = \int_0^\infty f(t) e^{-st} dt \quad (26)$$

(Boyce dan DiPrima, 2001:294)

di mana $t \geq 0$. $F(s)$ menyatakan lambang untuk hasil transformasi Laplace, \mathcal{L} merupakan operator transformasi Laplace, dan $f(t)$ suatu fungsi dalam waktu t . \mathcal{L} mentransformasi fungsi berdomain waktu $f(t)$ ke suatu fungsi baru dengan variabel bebas s , yaitu $F(s)$. s menyatakan peubah kompleks $s = a + bi$.

I. Fungsi Transfer

Fungsi transfer didefinisikan sebagai perbandingan transformasi Laplace dari output terhadap input dengan mengasumsikan semua kondisi awal sama dengan nol. Misal diberikan sistem :



Gambar 4. Blok Diagram Input, Sistem, dan Output

maka diperoleh persamaan fungsi transfer

$$G(s) = \frac{Y(s)}{O(s)} = \frac{\mathcal{L}[\text{output}]}{\mathcal{L}[\text{input}]} \quad (27)$$

(Rao, 2011:313).

J. Persamaan van der Pol

Persamaan van der Pol merupakan persamaan diferensial biasa yang dapat diturunkan dari persamaan diferensial Rayleigh dengan membedakan dan pengaturan $y = y'$. Ini adalah persamaan yang menggambarkan osilasi mandiri di mana energi dimasukkan ke osilasi kecil dan dihapus dari osilasi besar. Persamaan van der Pol adalah suatu persamaan diferensial tak linear yang dapat didekati dengan bentuk sistem persamaan diferensial linear.

Persamaan van der Pol ada dua macam baik yang homogen maupun yang non homogen. Bentuk umum dari persamaan van der Pol adalah :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \sigma^2x = F_0p(t) + \mu\phi(x)\frac{dx}{dt} \quad (28)$$

dimana $\phi(x)$: fungsi genap, $\phi(x) > 0$ untuk $|x| < 1$
 $\phi(x) < 0$ untuk $|x| > 1$

$p(t)$: periodik dengan periode T

μ dan σ : parameter-parameter positif

F_0 : konstan

1. Persamaan van der Pol Homogen

Jika $F_0 = 0$, maka (28) merupakan persamaan mandiri yang disebut persamaan van der Pol homogen. Persamaan van der Pol homogen mempunyai bentuk umum :

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \mu\phi(x)\frac{dx}{dt} + \sigma^2x = 0 \quad (29)$$

Jika diambil : $\phi(x) = 1 - x^2$ dan $\sigma^2 = 1$

Maka persamaan (29) menjadi :

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \mu(1 - x^2)\frac{dx}{dt} + x = 0 \quad (30)$$

Persamaan (30) merupakan persamaan osilasi homogen dengan redaman nonlinier $\mu(1 - x^2)\frac{dx}{dt}$ yang bernilai negatif untuk $x^2 > 1$ dan positif untuk $x^2 < 1$ dan dikatakan tak teredam jika $x^2 = 1$.

2. Persamaan van der Pol Non Homogen

Jika $F_0 \neq 0$, maka (28) merupakan persamaan tidak mandiri yang disebut persamaan van der Pol non homogen. Jika diketahui, misal :

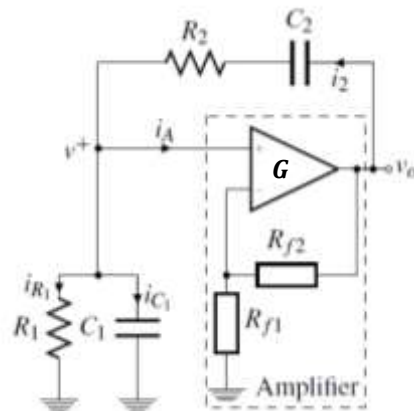
$$F_0 = a \sin(2\pi\nu t)$$

maka persamaan (30) menjadi :

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \mu(1 - x^2)\frac{dx}{dt} + x = a \sin(2\pi\nu t) \quad (31)$$

PEMBAHASAN

A. Rekonstruksi Model



Gambar 5. Rangkaian Osilator Wien
(Casaleiro, João. et al, 2014)

Rangkaian osilator Wien pada dasarnya terbentuk dari rangkaian op-amp non pembalik dengan sebuah resistansi R_1 yang dihubungkan di antara kaki atau pin masukan, serta sebuah resistansi feedback (R_{f1} dan R_{f2}) yang dihubungkan di antara pin keluaran dan masukan pembalik. Dengan i_{R1} adalah arus yang melalui resistansi R_1 , i_{C1} adalah arus yang melalui kapasitansi C_1 , i_A adalah arus input dari penguat operasional atau Gain (G), resistansi R_2 , kapasitansi C_2 dan tegangan keluaran v_0 .

Hukum Kirchhoff-Arus atau *Kirchhoff's Current Law* (KCL) atau sering disebut juga dengan Hukum Kirchhoff 1 dimana bunyi Hukum Kirchhoff 1 adalah sebagai berikut :

“Arus Total yang masuk melalui suatu titik percabangan dalam suatu rangkaian listrik sama dengan arus total yang keluar dari titik percabangan tersebut.” Berdasarkan Hukum Kirchoff pada simpul v^+ sebagai berikut :

$$i_2 = i_{R_1} + i_{C_1} + i_A \quad (32)$$

dimana i_{R_1} : arus yang melalui resistansi R_1 ,

i_{C_1} : arus yang melalui kapasitansi C_1 dan

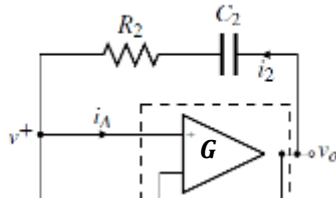
i_A : arus input dari penguat operasional atau Gain (G)

Bunyi dari Hukum Ohm adalah :

“Besarnya arus listrik (I) yang mengalir melalui sebuah penghantar atau konduktor akan berbanding lurus dengan beda potensial atau tegangan (V) yang diterapkan kepadanya dan berbanding terbalik dengan hambatannya (R)” dengan rumus sebagai berikut :

$$V = IR \rightarrow I = \frac{V}{R}$$

Berdasarkan rangkaian osilator Wien, loop umpan balik positif terdiri atas dua buah resistansi-kapasitansi terpisah (Z_s dan Z_p) dimana Z_s adalah impedansi seri dan Z_p adalah impedansi paralel yang didefinisikan sebagai $Z_s = R + \frac{1}{sC}$ dan $Z_p = R \left(\frac{1}{sC} \right)$. Rangkaian osilator Wien dipecah menjadi dua yaitu rangkaian atas dan rangkaian bawah.

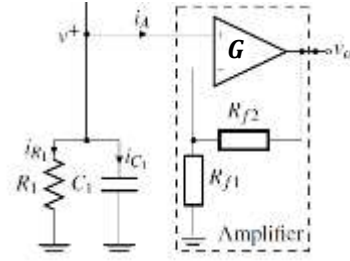


Gambar 6. Rangkaian Osilator Wien Bagian Atas
(Casaleiro, João. et al, 2014)

Perhatikan rangkaian di atas, rangkaian di atas bekerja ketika ada sumber tegangan masukan (v^+) dan tegangan keluaran (v_0). Arus (i_2) mengalir dari kutub negatif ke kutub positif. Kemudian arus (i_2) melewati resistansi dan kapasitansi (R_2 dan C_2) dan arus input (i_A) dari penguat operasional atau Gain (G) maka jika ditinjau berdasarkan hukum Ohm sebagai berikut :

$$i_2 = \frac{v_0 - v^+}{R_2 + \frac{1}{sC_2}} = \frac{1 - G^{-1}}{R_2 + \frac{1}{sC_2}} v_0 \quad (33)$$

karena berdasarkan gambar rangkaian di atas maka $V = v_0 - v^+$ dimana $v^+ = G^{-1}v_0$ dan karena rangkaian di atas adalah rangkaian seri maka berdasarkan definisi loop umpan balik positif $R = R_2 + \frac{1}{sC_2}$.



Gambar 7. Rangkaian Osilator Wien Bagian Bawah
(Casaleiro, João. et al, 2014)

Arus yang melalui R_1 dan C_1 adalah

$$i_{R_1} = \frac{v^+}{R_1} = \frac{G^{-1}}{R_1} v_0 \quad (34)$$

$$i_{C_1} = sC_1 G^{-1} v_0 \quad (35)$$

dan $i_A = 0$ asumsikan bahwa penguat operasional ideal.

dengan $s = j\omega_0$

dimana j adalah arah loop dan

ω_0 adalah frekuensi osilasi

Substitusi (35), (34) dan (33) ke (32) sebagai berikut :

$$i_2 = i_{R_1} + i_{C_1} + i_A$$

$$\frac{1 - G^{-1}}{R_2 + \frac{1}{sC_2}} v_0 = \frac{G^{-1}}{R_1} v_0 + sC_1 G^{-1} v_0$$

$$\frac{1 - G^{-1}}{R_2 + \frac{1}{sC_2}} v_0 - \frac{G^{-1}}{R_1} v_0 - sC_1 G^{-1} v_0 = 0$$

$$\frac{sC_2(1 - G^{-1})}{sC_2 R_2 + 1} v_0 - \frac{G^{-1}}{R_1} v_0 - sC_1 G^{-1} v_0 = 0$$

$$v_0 \left(\frac{sC_2(1 - G^{-1})}{sC_2 R_2 + 1} - \frac{G^{-1}}{R_1} - sC_1 G^{-1} \right) = 0$$

$$s \left(\frac{C_2(1 - G^{-1})}{sC_2 R_2 + 1} - C_1 G^{-1} \right) - \frac{G^{-1}}{R_1} = 0$$

$$s \left(\frac{C_2(1 - G^{-1}) - sC_2 R_2 C_1 G^{-1} - C_1 G^{-1}}{sC_2 R_2 + 1} \right) - \frac{G^{-1}}{R_1} = 0$$

$$\frac{sC_2(1 - G^{-1}) - s^2 C_2 R_2 C_1 G^{-1} - sC_1 G^{-1}}{sC_2 R_2 + 1} - \frac{G^{-1}}{R_1} = 0$$

$$\frac{sR_1 C_2(1 - G^{-1}) - s^2 R_1 C_1 R_2 C_2 G^{-1} - sR_1 C_1 G^{-1} - sR_2 C_2 G^{-1} - G^{-1}}{(sC_2 R_2 + 1)R_1} = 0$$

$$= 0$$

$$\frac{sR_1 C_2 - sR_1 C_2 G^{-1} - s^2 R_1 C_1 R_2 C_2 G^{-1} - sR_1 C_1 G^{-1} - sR_2 C_2 G^{-1} - G^{-1}}{sC_2 R_2 R_1 + R_1} = 0$$

$$= 0$$

$$\frac{sR_1 C_2 - G^{-1}(sR_1 C_2 + s^2 R_1 C_1 R_2 C_2 + sR_1 C_1 + sR_2 C_2 + 1)}{sC_2 R_2 R_1 + R_1} = 0$$

$$= 0$$

$$sR_1 C_2 - G^{-1}(sR_1 C_2 + s^2 R_1 C_1 R_2 C_2 + sR_1 C_1 + sR_2 C_2 + 1) = 0$$

$$-G^{-1}(sR_1 C_2 + s^2 R_1 C_1 R_2 C_2 + sR_1 C_1 + sR_2 C_2 + 1) = -sR_1 C_2$$

$$sR_1 C_2 + s^2 R_1 C_1 R_2 C_2 + sR_1 C_1 + sR_2 C_2 + 1 = sR_1 C_2 G$$

$$sR_1C_2 + s^2R_1C_1R_2C_2 + sR_1C_1 + sR_2C_2 + 1 - sR_1C_2G = 0$$

$$\frac{s}{R_2C_1} + s^2 + \frac{s}{R_2C_2} + \frac{s}{R_1C_1} + \frac{1}{R_1C_1R_2C_2} - \frac{sG}{R_2C_1} = 0$$

$$s^2 + \frac{s}{R_1C_1} + \frac{s}{R_2C_2} + \frac{s}{R_2C_1} - \frac{sG}{R_2C_1} + \frac{1}{R_1C_1R_2C_2} = 0$$

$$s^2 + s \left[\frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_2C_2} + \frac{1-G}{R_2C_1} \right] + \frac{1}{R_1C_1R_2C_2} = 0 \quad (36)$$

Asumsikan bahwa $R = R_1 = R_2$ dan $C = C_1 = C_2$ dapat disederhanakan menjadi :

$$s^2 + s \left[\frac{1}{RC} + \frac{1}{RC} + \frac{1-G}{RC} \right] + \frac{1}{R^2C^2} = 0$$

$$s^2 + s \frac{1}{RC} (3-G) + \left(\frac{1}{RC} \right)^2 = 0 \quad (37)$$

Menerapkan invers transformasi Laplace ke (37) diperoleh persamaan diferensial orde dua yang mewakili sistem dinamik :

$$\frac{d^2v_0}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{d}{dt} [(3-G)v_0] + \left(\frac{1}{RC} \right)^2 v_0 = 0 \quad (38)$$

dengan

$$v_0(t) = A_m(t) \sin(\omega_0 t + \phi) \quad (39)$$

dimana A_m adalah amplitudo osilasi,

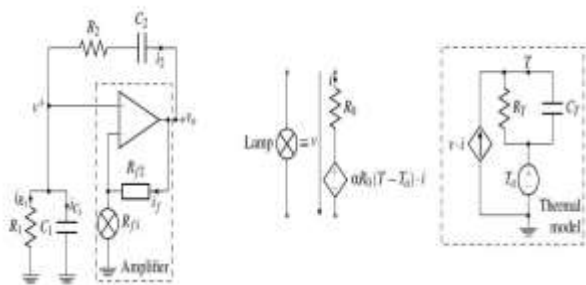
ω_0 adalah frekuensi osilasi dan

ϕ adalah fase

$$\text{dengan } G = \frac{R_{f2}}{R_{f1}} + 1 \quad (40)$$

Artinya yaitu, kondisi $\frac{R_{f2}}{R_{f1}} > 2$ telah dipenuhi untuk memulai osilasi. Frekuensi osilasi sebagai berikut :

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \quad (41)$$



Gambar 8. Rangkaian Osilator Wien dengan Pembatas Lampu Tungsten

(Casaleiro, João. et al, 2014)

Pembatas amplitudo menggunakan lampu tungsten (pijar) yang prinsip operasinya didasarkan pada umpan balik termal, yang berarti bahwa amplitudo yang tergantung pada suhu filamen, dan suhu tergantung pada kekuatan yang dihamburkan (efek joule). Oleh karena itu, perlawanan meningkat ketika tegangan output naik mengarah ke pengurangan gain. Hambatan listrik dari lampu, seperti kebanyakan logam dapat diperkirakan untuk rentang suhu terbatas, oleh :

$$R_{f1} \approx R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (42)$$

dimana R_0 adalah resistansi pada suhu referensi (T_0),

α adalah koefisien temperatur dari resistansi dan

T adalah suhu filamen

Untuk menentukan hubungan antara resistansi dan amplitudo perlu untuk menentukan pertama hubungan antara kekuatan yang dihamburkan dengan suhu filamen. Tingkat panas yang terakumulasi dalam filamen adalah daya listrik yang diterapkan dikurangi tingkat kehilangan panas, oleh :

$$C_f \frac{dT}{dt} = P - \delta(T - T_a) \quad (43)$$

dimana P adalah daya listrik,

δ adalah disipasi lampu konstan,

T_a adalah suhu lingkungan dan

C_f adalah kapasitansi termal lampu

Solusi dari persamaan (43) sebagai berikut :

$$C_f dT - (P - \delta(T - T_a))dt = 0$$

$$M = C_f \text{ dan } N = -(P - \delta(T - T_a)) = -P + \delta T - \delta T_a$$

$$M_t = 0$$

$$N_T = \delta \} M_t \neq N_T$$

Maka Pers. (43) dikatakan PD tak Eksak

$$\left(\frac{M_t - N_T}{N} \right) = \left(\frac{-\delta}{-P + \delta T - \delta T_a} \right) = \frac{\delta}{P - \delta T + \delta T_a} = f(x)$$

karena menghasilkan fungsi dalam T saja, maka μ bergantung pada T saja.

Sehingga

$$\mu = e^{\int f(T) dT} = e^{\int \frac{\delta}{P - \delta T + \delta T_a} dT} = \frac{\delta}{P - \delta T + \delta T_a}$$

Kalikan μ ke PD didapat

$$C_f dT - (P - \delta(T - T_a))dt \frac{\delta}{P - \delta T + \delta T_a} = 0$$

$$\frac{\delta C_f}{P - \delta T + \delta T_a} dT - \frac{\delta(P - \delta(T - T_a))}{P - \delta T + \delta T_a} dt = 0$$

$$\frac{\delta C_f}{P - \delta T + \delta T_a} dT - \delta dt = 0$$

$$M(T, t) = \frac{\delta C_f}{P - \delta T + \delta T_a} \text{ dan } N(T, t) = -\delta$$

$$M_t(T, t) = 0 \} M_t = N_T$$

$$N_T(T, t) = 0$$

karena $M_t = N_T$ maka PD Eksak, sehingga memenuhi

$$\Psi_T(T, t) = M(T, t)$$

$$\Psi(T, t) = \int M(T, t) dT + \phi(t)$$

$$\Psi(T, t) = \int \left(\frac{\delta C_f}{P - \delta T + \delta T_a} \right) dT + \phi(t)$$

$$\Psi(T, t) = C_f \int \frac{\delta}{P - \delta T + \delta T_a} \frac{d(P - \delta T + \delta T_a)}{-\delta} + \phi(t)$$

$$\Psi(T, t) = -C_f \ln(P - \delta T + \delta T_a) + \phi(t)$$

$$\text{dan } \Psi_t(T, t) = N(T, t)$$

$$-C_f \ln(P - \delta T + \delta T_a) + \varphi'(t) = -\delta$$

$$\varphi'(t) = C_f \ln(P - \delta T + \delta T_a) - \delta$$

$$\varphi(t) = -t(T)\delta + C$$

Diperoleh

$$\Psi(T, t) = -C_f \ln(P - \delta T + \delta T_a) - t(T)\delta + C$$

$$-C_f \ln(P - \delta T + \delta T_a) - t(T)\delta + C = 0$$

$$-C_f \ln(P - \delta T + \delta T_a) = \delta$$

$$\ln(P - \delta T + \delta T_a) = \frac{\delta}{-C_f}$$

$$P - \delta T + \delta T_a = e^{-\frac{\delta}{C_f}}$$

$$P - \delta(T - T_a) = e^{-\frac{\delta}{C_f}}$$

$$\delta(T - T_a) = P - e^{-\frac{\delta}{C_f}}$$

$$T - T_a = \frac{P - e^{-\frac{\delta}{C_f}}}{\delta}$$

$$T = T_a + \frac{P - e^{-\frac{\delta}{C_f}}}{\delta}$$

$$T = T_a + \frac{P}{\delta} \left(1 - e^{-\left(\frac{\delta}{C_f}\right)} \right) \quad (44)$$

Untuk keadaan steady-state, $t = \infty$, diperoleh :

$$T = T_a + \frac{P}{\delta} \quad (45)$$

Substitusi (45) ke (42) sebagai berikut :

$$R_{f1} \approx R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

$$R_{f1} \approx R_0 \left[1 + \alpha \left(T_a + \frac{P}{\delta} - T_0 \right) \right]$$

$$R_{f1} \approx R_0[1 + \alpha(T_a - T_0)] + \frac{\alpha}{\delta} R_0 P \quad (46)$$

Daya lampu (P) sebagai berikut :

$$P = R_{f1} \cdot i_f^2 \quad (47)$$

Dimana

$$i_f = \sqrt{\frac{\delta}{\alpha R_{f1}} \left(T_a \left(\frac{1}{\alpha - \frac{\alpha^2 v_0^2}{R_0 \delta G^2}} - 1 \right) - \frac{1}{\alpha} + T_0 \right)}$$

Substitusi (47) ke (46) dan mengatur ulang kembali, diperoleh :

$$R_{f1} \approx R_0[1 + \alpha(T_a - T_0)] + \frac{\alpha}{\delta} R_0 P$$

$$R_{f1} \approx R_0[1 + \alpha(T_a - T_0)] + \frac{\alpha}{\delta} R_0 \cdot R_{f1} \cdot i_f^2$$

$$R_{f1} \approx R_0[1 + \alpha(T_a - T_0)] + \frac{\alpha}{\delta} R_0 \cdot R_{f1} \cdot$$

$$\frac{\delta}{R_{f1}} \left(T_a \left(\frac{1}{\alpha - \frac{\alpha^2 v_0^2}{R_0 \delta G^2}} - 1 \right) - \frac{1}{\alpha} + T_0 \right)$$

$$R_{f1} \approx R_0 + R_0 \alpha T_a - R_0 \alpha T_0 + \frac{\alpha R_0 T_a}{\alpha - \frac{\alpha^2 v_0^2}{R_0 \delta G^2}} - \alpha R_0 T_a$$

$$- \frac{\alpha R_0}{\alpha} + \alpha R_0 T_0$$

$$R_{f1} \approx \frac{\alpha R_0 T_a}{\alpha - \frac{\alpha^2 v_0^2}{R_0 \delta G^2}}$$

$$R_{f1} \approx \frac{\alpha R_0 T_a}{\alpha \left(1 - \frac{\alpha v_0^2}{R_0 \delta G^2} \right)}$$

$$R_{f1} \approx \frac{R_0(T_a)}{1 - \frac{\alpha}{R_0 \delta G^2} v_0^2} \quad (48)$$

Substitusi (48) ke (38) diperoleh :

$$\frac{d^2 v_0}{dt^2} + \frac{1}{RC} \left[\left(2 - \frac{R_{f2}}{R_0(T_a)} \right) + \frac{3\alpha R_{f2}}{R_0^2(T_a) \delta G^2} v_0^2 \right] \frac{dv_0}{dt} + \omega_0^2 v_0 = 0 \quad (49)$$

dimana bisa ditulis ulang dalam bentuk van der Pol osilator sebagai berikut :

$$\frac{d^2 v_0}{dt^2} - 2(\delta_0 - \delta_2 v_0^2) \frac{dv_0}{dt} + \omega_0^2 v_0 = 0 \quad (50)$$

dimana

$$\delta_0 = \frac{\left(\frac{R_{f2}}{R_0(T_a)} - 2 \right)}{2RC} \quad (51)$$

dan

$$\delta_2 = \frac{1}{2RC} \frac{3\alpha R_{f2}}{R_0^2(T_a) \delta G^2} \quad (52)$$

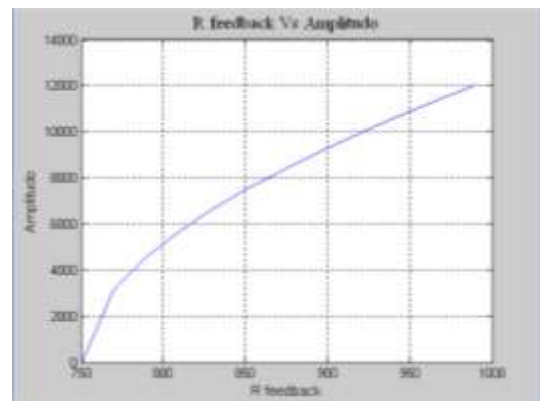
Amplitudo osilasi dari van der Pol osilator sebagai berikut:

$$A_m = 2 \sqrt{\frac{\delta_0}{\delta_2}} \quad (53)$$

Substitusi (51) dan (52) ke (53) menghasilkan amplitudo osilasi sebagai berikut :

$$A_m = 2G \sqrt{\frac{\delta}{3\alpha} \left[1 - 2 \frac{R_0(T_a)}{R_{f2}} \right] R_0(T_a)} \quad (54)$$

B. Simulasi



Gambar 9. Grafik Hubungan Amplitudo dengan R Feedback

Gambar 9 menunjukkan bahwa semakin besar resistansi umpan balik (feedback) maka semakin besar amplitudonya tetapi amplitudonya belum mencapai stabil.

Persamaan differensial dari persamaan (49) adalah :

$$\frac{d^2 v_0}{dt^2} + \frac{1}{RC} \left[\left(2 - \frac{R_{f2}}{R_0(T_a)} \right) + \frac{3\alpha R_{f2}}{R_0^2(T_a)\delta G^2} v_0^2 \right] \frac{dv_0}{dt} + \omega_0^2 v_0 = 0$$

Atau dapat dituliskan dalam bentuk :

$$\ddot{V} + a_1 \dot{V} + a_0 V = 0 \quad (55)$$

Dengan :

$$G = \frac{R_f}{R_b} (V' \times V) + 1 \quad (56)$$

$$\omega_0 = \left(\frac{1}{C \times R} \right) \quad (57)$$

$$a_1 = \left(\frac{1}{R \times C} \right) \times \left(2 - \left(\frac{R_f}{R_b} (V' \times V) \right) \right) + \frac{(3 \times R_f)}{(R_b (V' \times V)^{2 \times G})} \quad (58)$$

$$a_0 = \omega_0^2 \quad (59)$$

Model dari lampu tungsten menggunakan persamaan (44):

$$T = T_a + \frac{P}{\delta} \left(1 - e^{-\left(\frac{\delta}{c_f} \right)} \right)$$

Digunakan fungsi pendekatan $R_b = @(v2) Rb0 + (1 - \exp(-v2/Rb0))$. Selanjutnya dilakukan penyelesaian dari persamaan differensial menurut persamaan (54) memakai perintah $[T, V, Y] = \text{solver}(t, V0, Vcc, Rf, Rb, R, C)$.

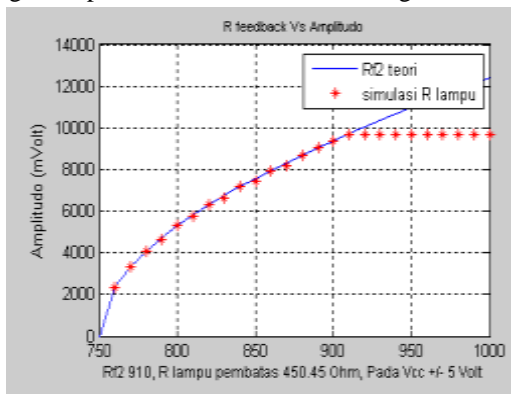
Menghitung tegangan v_0 menggunakan persamaan (48) :

$$R_{f1} \approx \frac{R_0(T_a)}{1 - \frac{\alpha}{R_0 \delta G^2} v_0^2}$$

Dengan :

$$G = \frac{R_{f2}}{R_{f1}} + 1$$

Hasil dari simulasi untuk mendapatkan amplitudo pada tegangan amplifier $-5V$ dan $+5V$ adalah grafik berikut :

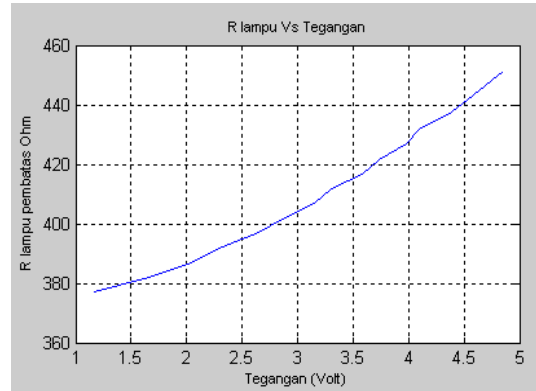


Gambar 10. Grafik Kestabilan Amplitudo dengan R Feedback

Pada gambar 10 kurva (solid) merupakan amplitudo dari sistem tanpa pengaruh lampu tungsten, sedangkan kurva dengan tanda * merupakan amplitudo dari sistem dengan pengaruh lampu tungsten. Kurva (solid) menunjukkan bahwa semakin besar resistansi umpan balik (feedback) maka semakin besar amplitudo. Pada keadaan ini sistem

tidak stabil. Kurva dengan tanda * menunjukkan bahwa semakin besar resistansi umpan balik (feedback) maka semakin besar amplitudo, tetapi saat resistansi umpan balik (feedback) di atas 910 Ohm amplitudo sistem secara konstan bernilai 9500 mVolt. Pada keadaan ini sistem stabil.

Simulasi dari fungsi model lampu didapatkan grafik hubungan antara tegangan dan resistansi lampu berikut :



Gambar 11. Grafik Hubungan Resistansi Lampu dan Tegangan

Gambar 11 menunjukkan bahwa nilai tegangan terhadap resistansi lampu berbanding lurus sehingga semakin besar resistansi lampu maka semakin besar pula tegangannya.

Untuk menggambarkan bentuk gelombang osilasi dari osilator Wien, dipergunakan teori yang ada pada jurnal Analog and Telecommunication Electronics oleh Emilio Orlandini dari Politecnico di Torino tahun 2015, yang mengatakan bahwa osilasi mulai terjadi bilamana penguatan amplifier (gain) lebih dari 3 dB. Sedangkan gain amplifier (G) menggunakan rumus pada persamaan (40), sehingga untuk mendapatkan gain lebih dari 3 dB adalah dengan membagi G dengan nilai yang mendekati 1 atau sebesar $\frac{1}{0,99}$.

Untuk R_{f2} mengambil nilai pada grafik hasil simulasi atau sebesar 910 Ohm, maka fungsi R_{lampu} ditulis :

$$R_{lampu} = \left(\frac{1}{0,99} \right) \times 2 \times R_{f2} \quad (60)$$

Menurut Roberge (1975:485), nilai fungsi transfer open loop $L=A \times B$ adalah

$$L(s) = \frac{3RCs}{R^2C^2s^2 + 3RCs + 1} \quad (61)$$

Persamaan diatas dibagi dengan $\frac{(R \times C)}{(R \times C)}$, maka penulisan fungsi di Matlab adalah $L = \text{tf}([(1+(R2s/R1s)) 0], [C*R 3 (1/(C*R))])$.

Sehingga nilai fungsi transfer adalah

$$3.02 \text{ s}$$

$$1e-005 \text{ s}^2 + 3 \text{ s} + 1e005$$

(62)

Menurut Ueta dan Kawakami (2004), nilai fungsi transfer closed loop adalah

$$H(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 - A(j\omega)\beta(j\omega)} \quad (63)$$

Dengan

$$A(j\omega) = G_s \quad (64)$$

Maka penulisannya di Matlab adalah $A_f = (1 + R2s/R1s)/(1-L)$.

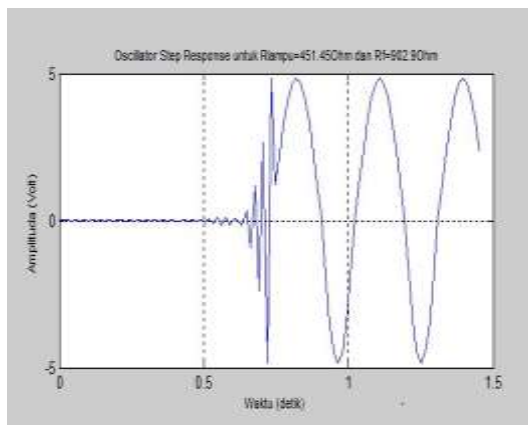
Hasil fungsi transfernya adalah

$$3.02e-005 \text{ s}^2 + 9.061 \text{ s} + 3.02e005$$

$$1e-005 \text{ s}^2 - 0.0202 \text{ s} + 1e005$$

(65)

Hasil simulasi menunjukkan pada waktu gain lebih dari 3 dB maka sistem mulai berosilasi dan pada waktu gain sama dengan 3 dB maka sistem sudah berosilasi secara stabil adalah



Gambar 12. Grafik Sistem Osilasi Stabil

Gambar 12 menunjukkan bahwa sistem berosilasi di atas waktu sekitar 0,8 detik yang berosilasi secara periodik.

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dapat ditarik simpulan sebagai berikut :

1. Model osilator Wien dengan pembatas amplitudo menggunakan lampu tungsten adalah $\frac{d^2 v_0}{dt^2} + \frac{1}{RC} \left[\left(2 - \frac{R_{f2}}{R_0(T_a)} \right) + \frac{3\alpha R_{f2}}{R_0^2(T_a)\delta G^2} v_0^2 \right] \frac{dv_0}{dt} + \omega_0^2 v_0 = 0$ yang digunakan untuk mensimulasikan hubungan amplitudo dengan resistansi umpan balik (feedback) dan resistansi lampu tungsten.
2. Amplitudo osilasi dengan pembatas amplitudo menggunakan lampu tungsten atau persamaan untuk

mengetahui hubungan antara resistansi umpan balik (feedback) adalah

$$A_m = 2G \sqrt{\frac{\delta}{3\alpha}} \sqrt{\left[1 - 2 \frac{R_0(T_a)}{R_{f2}} \right] R_0(T_a)}.$$

3. Hasil simulasi menunjukkan pada waktu gain lebih dari 3 dB maka sistem mulai berosilasi dan pada waktu gain sama dengan 3 dB maka sistem sudah berosilasi secara stabil atau dengan kata lain sistem berosilasi di atas waktu sekitar 0,8 detik yang berosilasi secara periodik.

B. Saran

Penelitian saat ini bersifat matematis, sehingga pada penelitian selanjutnya ada baiknya dilakukan pengecekan secara nyata dengan menggunakan rangkaian penelitian ini, dibangun secara fisik, dan dilakukan pengetesan menggunakan oscilloscope, agar dapat diketahui seberapa besar kesalahan antara simulasi matematis dengan pengukuran nyata.

DAFTAR PUSTAKA

- Barmawi, Malvino. 1985. *Prinsip-Prinsip Elektronika Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.
- Boyce, W. E. and DiPrima, R. C. 2001. *Elementary Differential Equations and Boundary Value Problem*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Bronson, R. dan Costa, G. B. 2006. *Differential Equation Third Edition*. USA.
- Casaleiro, João. Oliveira, Luís B. dan Pinto, António C. 2014. *Van der Pol Approximation Applied to Wien Oscillators*. Procedia Technology 17 335 – 342 (diunduh tanggal 11 November 2016).
- Chattopadhyay, D. 1989. *Dasar Elektronika*. Jakarta: Universitas Indonesia (UI Press).
- Dickson. 2016. *Pengertian Osilator, Prinsip Kerjanya, Rumus dan Bunyi Hukum Ohm* (Online), (<http://teknikelektronika.com/pengertian-osilator-prinsip-kerja-oscillator/>), diakses tanggal 11 Desember 2016).
- Kurniawan, Alfian Wahyu. dan Rosyadi, M. Shirojudin. 2015. *Laporan Project (MODUL) Osilator Jembatan Wien*. Malang: Universitas Negeri Malang.
- Orlandini, Emilio. 2015. *Analog and Telecommunication Electronics Miniproject: Wien-Bridge Oscillators*. Torino: Politecnico.
- Pakteo. 2010. *Pemancar Radio*, (Online), (<https://pakteo.wordpress.com/2010/02/09/pemancar-radio/>), diakses tanggal 25 Desember 2016).
- Prawoto, Budi Priyo. 2014. *Persamaan Diferensial Biasa*. Surabaya: Jurusan Matematika UNESA.

- Purnama, Agus. 2012. *Hukum Kirchhoff*, (Online), (<http://elektronika-dasar.web.id/hukum-kirchhoff/>), diakses tanggal 20 Desember 2016).
- Purnama, Agus. 2012. *Operasional Amplifier (Op-Amp)*, (Online), (<http://elektronika-dasar.web.id/operasional-amplifier-op-amp/>), diakses tanggal 20 Desember 2016).
- Rao, Singiresu S. 2011. *Fifth Edition Mechanical Vibrations*. USA. Prentice Hall.
- Roberge, James K. 1975. *Operational Amplifiers Theory and Practice*. New York: John Wiley & Sons.
- Setyawan, Yudi. 1992. *Bifurkasi Pada Persamaan Van der Pol*. Tesis. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Susanti, Eka. 2014. *Bahan Ajar Praktek Perancangan Telekomunikasi*. Palembang: Politeknik Negeri Sriwijaya.
- Ueta, T. dan Kawakami, H. 2004. *An Aspect of Oscillatory Conditions in Linear Systems and Hopf Bifurcations in Nonlinear Systems*. Japan: Tokushima University.